

⑫ **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

⑲ Anmeldenummer: 80101034.9

⑤① Int. Cl.³: **C 01 B 3/04, B 01 J 31/16,**
B 01 J 19/08

⑳ Anmeldetag: 03.03.80

③① Priorität: 06.03.79 DE 2908633

⑦① Anmelder: Studiengesellschaft Kohle mbH,
Kaiser-Wilhelm-Platz 1, D-4330 Mülheim/Ruhr (DE)

④③ Veröffentlichungstag der Anmeldung: 17.09.80
Patentblatt 80/19

⑦② Erfinder: Kisch, Horst, Dr., Bismarckstrasse 43,
D-4300 Mülheim/ruhr (DE)

⑧④ Benannte Vertragsstaaten: AT BE CH DE FR GB IT LU
NL SE

⑦④ Vertreter: von Kreisler, Alek et al, Deichmannhaus am
Hauptbahnhof, D-5000 Köln 1 (DE)

⑤④ Verfahren zur photochemischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser.

⑤⑦ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur photochemischen, katalytischen Spaltung von Wasser zu u.a. Wasserstoff, wobei man als Katalysatoren Metallkomplexverbindungen von Metallen der I, II, IV, V, VI, VII und VIII Nebengruppe des Periodensystems sowie Magnesium, in denen die Komplexliganden über je zwei Schwefelatome oder über ein Schwefel- und ein Stickstoffatom an das Metall gebunden sind, einsetzt.

EP 0 015 522 A2

Studiengesellschaft Kohle mbH., Mülheim/Ruhr, Deutschland

Verfahren zur photochemischen Erzeugung von
Wasserstoff aus Wasser

Das erfindungsgemäße Verfahren betrifft die Erzeugung von Wasserstoff durch photochemische, katalytische Spaltung von Wasser mittels Metallkatalysatoren.

In der Literatur sind bisher drei Beispiele nicht enzymatischer, homogener, metallkatalysierter Photolysen von Wasser bekannt. J.-M. Lehn und J.-P. Sauvage (Nouv. J. Chim. 1 (1977), 449) beschreiben ein Vierkomponentensystem, bestehend aus Tris(α, α' -Dipyridyl)Ruthenium(II)dichlorid, dem milden Reduktionsmittel Triäthanolamin, einem "Rhodiumbipyridylkomplex" und K_2PtCl_6 . Dieses System produziert beim Belichten in wässriger Lösung maximal 4 ml H_2 in 1.5 Stunden.

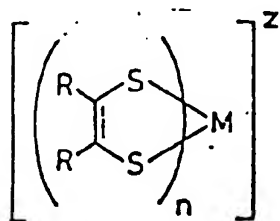
H. Kagan et al. (Nouv. J. Chim. 2 (1978), 547) verwenden ein geringfügig modifiziertes System: Tris(α, α' -Dipyridyl)Ruthenium(II)dichlorid, Äthylendiamintetraessigsäure, Methylviologen und kolloidales Platin oder Gold. Sie erhalten maximal 10 ml H_2 in etwa 10 Stunden.

J. Kiwi und M. Grätzel publizierten gleichzeitig (Helv. Chim. Acta 61 (1978), 2720) mit Kagan ein fast identisches System, in dem lediglich PtO_2 (Adamskatalysator) an die Stelle von Platin bzw. Gold im Kagan'schen Katalysatorsystem getreten ist. Diese Autoren erhalten 0.4 ml H_2 in 0.5 Stunden.

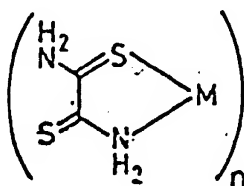
Überraschenderweise wurde nun gefunden, dass man mit schwefelhaltigen Metallkomplexen als Katalysatoren, Wasserstoff in bisher nicht erreichter Menge photochemisch aus Wasser erzeugen kann.

0015522

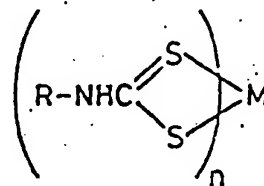
Als Katalysatoren eignen sich Komplexverbindungen, welche aus org. Schwefelverbindungen und Metallsalzen von Metallen der I, II, IV, V, VII und VIII Nebengruppe des Periodensystems sowie Magnesium gebildet werden. Insbesondere sind organische Schwefelverbindungen von Metallen wie Titan, Vanadium, Chrom, Molybdän, Wolfram, Mangan, Rhenium, Eisen, Osmium, Kobalt, Nickel, Palladium, Platin, Kupfer, Gold, Zink, Cadmium und Magnesium geeignete Katalysatoren. Typische Katalysatoren im Sinne der Erfindung sind Metalldithiolene des Typs 1 (G.N. Schrauzer, Adv. Chem. Ser. 110 (1972), 73; J.A. McCleverty, Progr. Inorg. Chem. 10 (1968), 49; E. Hoyer et al, Phosphor. and Sulf. 7 (1979) 49), Metaldithiooxamide vom Typ 2 (P. Ray und R.M. Ray, Quarterly Journ. Indian Chem. Soc. 3, 118; Chem. Zentralblatt (1926) II, 2158) sowie Metaldithiocarbamate, Typ 3 (B.B. Kaul und K.B. Pandeya, J. Inorg. Nucl. Chem. 40 (1978), 229).



1



2



3

M = ein Metall der I, II, IV, V, VI, VII und VIII Nebengruppe des Periodensystems oder Magnesium.

Die organischen Liganden R können Wasserstoff, Alkyl-, Trifluormethyl-, Aryl-, Thioalkyl-, Thioaryl- oder Trithiocarbonatgruppen sein, n = 2 oder 3, z = 0, -1 oder -2.

Das Verfahren wird vorzugsweise in einem Lösungsmittel durchgeführt. Neben Wasser eignen sich hierzu vor allem Mischungen von Wasser mit einem organischen Lösungsmittel wie Tetrahydrofuran (THF), Dihydrofuran, bevorzugt 2,5-Dihydrofuran, oder Methylenechlorid.

Als Lichtquelle kann ein Hochdruck-Quecksilberdampfstrahler (z.B. Philips HPK 125 W) oder eine andere Lampe verwendet werden, welche Licht der Wellenlänge $\lambda \geq 254$ nm emittiert, also auch

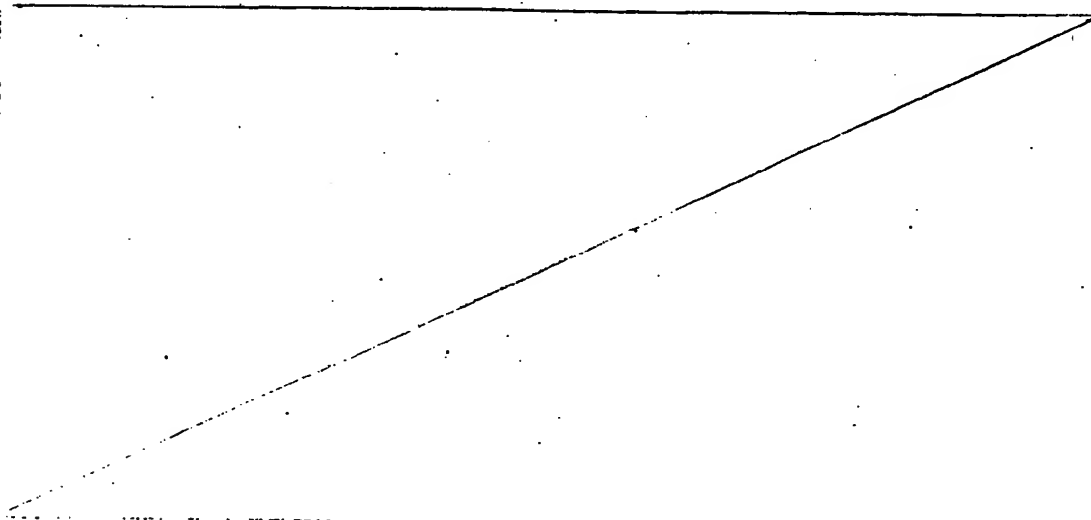
Sonnenlicht.

Das Verfahren wird zweckmäßigerweise bei Raumtemperatur durchgeführt, aber auch höhere Temperaturen, insbesondere die Siedetemperatur des jeweiligen Lösungsmittels fördern die Reaktionsgeschwindigkeit des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Die Geschwindigkeit der Wasserstoffentwicklung (Umsatzzahl) ist abhängig vom Katalysatortyp, der Natur des Liganden R und der Art des Zentralmetalls. Dithiolen- und Dithiooxamidkomplexe von Eisen und Nickel besitzen größere katalytische Aktivität als Cobalt- oder Palladiumverbindungen. Besonders hervorzuheben ist, daß auch Magnesium als Zentralmetall beträchtliche katalytische Wirksamkeit hat. Die maximalen Umsatzzahlen betragen bis zu einigen tausend Mol H_2 /Mol Katalysator, die Mengen an erzeugtem Wasserstoff um einige Liter.

As erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht erstmalig die katalytische, photochemische Erzeugung größerer Mengen von Wasserstoff aus Wasser mittels einfacher Metallkatalysatoren. Wasserstoff ist bekanntermaßen als Energieträger anstelle von Mineralölen oder fossilen Brennstoffen oder in weiten Bereichen als Reduktionsmittel bei chemischen Prozessen verwendbar.

Die folgenden aufgeführten Beispiele erläutern das allgemeine Prinzip der Erfindung:

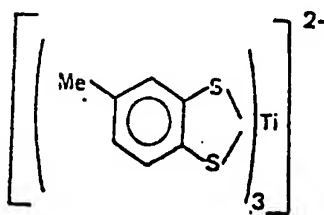
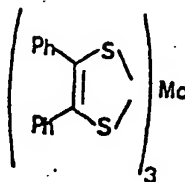
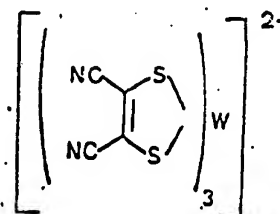


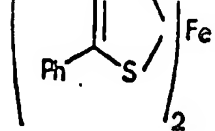
Beispiele 1 - 15

Die metallkatalysierte, photochemische Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser erfolgt durch Einsatz folgender Metallkatalysatoren:

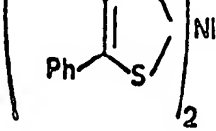
- 1 Diethylammonium-tris(tolyl-3,4-dithiolato)titanat (2-)
- 2 Tris(cis-stilben-1,2-dithiolato)molybdän
- 3 Tetrabutylammonium-tris[(cis-1,2-dicyanoethylen-1,2-dithiolato)-S,S]wolframat (2-)
- 4 Bis(cis-stilben-1,2-dithiolato)eisen
- 5 Bis(cis-stilben-1,2-dithiolato)nickel
- 6 Tetrabutylammonium-bis(cis-stilben-1,2-dithiolato)niccolat(1-)
- 7 Bis(cis-2-Buten-2,3-dithiolato)nickel
- 8 Tetrabutylammonium-bis(ethylen-cis-1,2-dithiolato)niccolat(1-)
- 9 Tetrabutylammonium-bis[(cis-1,2-dicyanoethylen-1,2-dithiolato)-S,S] niccolat(2-)
- 10 Tris(dithiooxamido)dinickel
- 11 Bis(benzol-1,2-diiminato)nickel
- 12 (2,2'-Bipyridin)(cis-Stilben-1,2-dithiolato)nickel
- 13 Bis(cis-stilben-1,2-dithiolato)platin
- 14 Tetrabutylammonium-bis[(cis-1,2-dicyanoethylen-1,2-dithiolato)-S,S]zincat(2-)
- 15 Tetrabutylammonium-bis[(cis-1,2-dicyanoethylen-1,2-dithiolato)-S,S]magnesium(II)

Die systematischen Zeichnungen für diese Komplexe 1 - 15 sind:

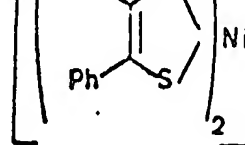
123



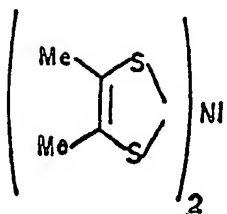
4



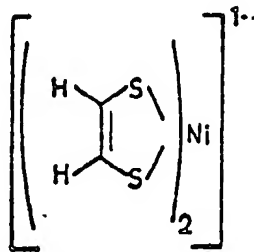
5



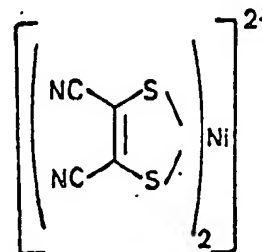
6



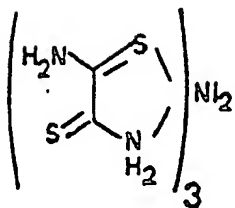
7



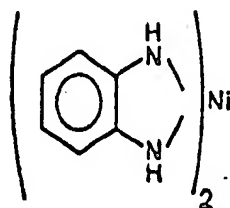
8



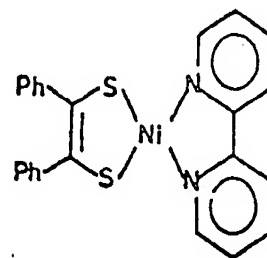
9



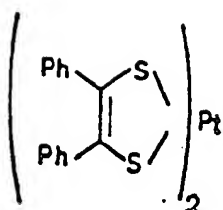
10



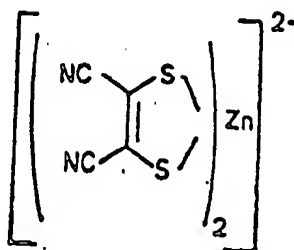
11



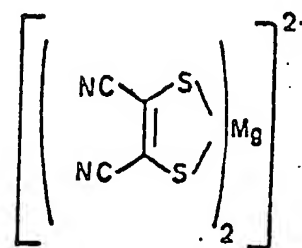
12



13



14



15

In einer Tauchlampenapparatur mit Quarzinnenschacht, in den eine Lampe: Philips HPK 125 Watt eingeführt wurde, wurden die in der folgenden Tabelle aufgeführten mMole des Metallkatalysators in 150 ml THF/Wasser, Mischungsverhältnis 2 : 1, als Lösungsmittel 20 Stunden belichtet. Dabei entwickelte sich, wie aus der Tabelle ersichtlich, eine bestimmte Menge an Millimolen Wasserstoff, aus denen sich die in der letzten Spalte aufgeführten Umsatzzahlen errechnen lassen.

Katalysator				
Nr.	Komplextyp mMol	M,R,n,z	mMol H ₂	Umsatzzahl (mMol H ₂ /mMol Katalysator/h)
1	<u>1</u> , 0.08	Ti, m-CH ₃ C ₆ H ₆ , 3,-2	2.6	1.9
2	<u>1</u> , 0.021	Mo, Ph, 3,0	1.81	4.3
3	<u>1</u> , 0.089	W, CN, 3,-2	3.47	1.9
4	<u>1</u> , 0.023	Fe, Ph, 2,0	2.15	4.7
5	<u>1</u> , 0.021	Ni, Ph, 2,0	1.18	2.8
6	<u>1</u> , 0.022	Ni, Ph, 2,-1	1.36	3.1
7	<u>1</u> , 0.022	Ni, Me, 2,0	2.52	5.7
8	<u>1</u> , 0.022	Ni, H, 2,-1	2.72	6.3
9	<u>1</u> , 0.021	Ni, CN, 2,-2	2.13	5.1
10	<u>2</u> , 0.02	Ni	2.96	7.4
11	<u>2</u> , 0.2	Ni	1.26	7.0
12	<u>1</u> , 0.085	Ni	1.48	0.9
13	<u>1</u> , 0.02	Pt, Ph, 2,0	1.87	4.7
14	<u>1</u> , 0.12	Zn, CN, 2,-2	11.1	4.6
15	<u>1</u> , 0.05	Mg, CN, 2,-2	3.4	1.0

Beispiel 16

99 mg (0.12 mMol) des Bis-(tetrabutylammonium)-Zinkdithiolens vom Typ 1 ($R=CN$, $N = 2$, $z = -2$) werden in THF/D₂O = 1 : 1 (Volumenverhältnis) gelöst und in eine Tauchlampenapparatur (Lampe: Philips HPK 125 W) aus Solidexglas gefüllt. Die Lösung wird 30 Minuten mit Argon gespült und dann 96 Stunden lang belichtet. Es entstehen 150 ml (6,7 mMol) Wasserstoff (Umsatzzahl in Mol H₂/Mol Katalysator = 56). Massenspektrographische Gasanalyse ergibt ein Verhältnis von D₂ : HD : H₂ = 10 : 1 : 0.

Beispiel 17

Wie Beispiel 16, jedoch werden 55 mg (0.09 mMol) des Bis-(tetramethylammonium)-Zinkdithiolens vom Typ 1 ($R=R=SCS_2$, $N = 2$, $z = -2$) und 2,5-Dihydrofuran/H₂O = 1/1 verwendet. In 24 Stunden entstehen 515 ml Wasserstoff (Umsatzzahl = 255).

Beispiel 18

Wie Beispiel 16, jedoch wird die Belichtung in einer Tauchlampenapparatur mit Quarzinnenschacht durchgeführt. In 12 Stunden entstehen 170 ml Wasserstoff; D₂ : HD : H₂ = 6 : 1 : 0.

Beispiel 19

Wie Beispiel 18, jedoch werden 50 mg (0.06 mMol) des Zinkdithiolens und 2,5-Dihydrofuran/D₂O = 1/1 verwendet. In 24 Stunden entstehen 2.153 Liter Wasserstoff (Umsatzzahl = 1600); D₂ : HD : H₂ = 3.6 : 1 : 0.14.

Beispiel 20

Wie Beispiel 18, jedoch THF/H₂O = 2 : 1; 12,5 mg (0.023 mMol) Eisendithiolen vom Typ 1 ($R=Ph$, 2,0); in 67 Stunden erhält man 100.5 ml (4.48 mMol) Wasserstoff (Umsatzzahl = 195).

Beispiel 21

Wie Beispiel 18; 1 g (1.8 mMol) Nickeldithiolen vom Typ 1 (R=Ph, 2,0); in 66 Stunden 425 ml (18.97 mMol) Wasserstoff (Umsatzzahl = 10).

Beispiel 22

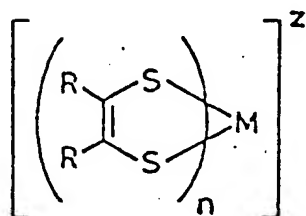
32 mg (0.0386 mMol) von $(\text{Bu}_4\text{N}_2 \text{ C}_2\text{S}_2 (\text{CN})_2 \text{Zn}$ (14) werden in einem Gemisch aus 40 ml THF und 20 ml Wasser gelöst und in einem Quarzreagenzglas mit Gummidichtung und Schraubverschluß zehn Tage dem Tageslicht ausgesetzt (Mülheim-Ruhr, 5. - 15. Febr. 1979). Gaschromatographische H_2 -Bestimmung ergab 0.02 ml Wasserstoff.

Beispiel 23

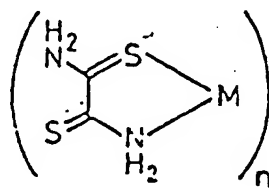
Herstellung des bisher nicht bekannten $[(\text{CN})_2\text{C}_2\text{S}_2]_2\text{Mg} [(\text{C}_4\text{H}_9)_4\text{N}]_2$ 950 mg (5.1 mMol) von Dinatrium-cis-1,2-dicyanoethylen-1,2-dithiolat (G. Bähr und G. Schleitzer, Chem. Ber. 90 (1957) 438) werden in 10 ml warmen $\text{MeOH}/\text{H}_2\text{O} = 1/1$ gelöst und tropfenweise mit 0.5 g wasserfreiem MgCl_2 , gelöst in 5 ml $\text{MeOH}/\text{H}_2\text{O} = 1/1$, versetzt. Die Lösung wurde filtriert und bei Raumtemperatur mit 1.1 g (2.9 mMol) Tetrabutylammoniumjodid versetzt. Stehen lassen über Nacht ergibt $(\text{Bu}_4\text{N}_2 [(\text{CN})_2\text{C}_2\text{S}_2]_2\text{Mg}$ (Katalysator gemäß Beispiel 15) in Form orange gefärbter Kristalle: $F_p = 103 - 104^\circ\text{C}$ Anal. Gef. (Ber.): C 60.86 (60.91), H 9.06 (9.23), N 10.51 (10.76) S 16.05 (16.41), Mg 3.04 (3.1) IR (KBr): 218 Os, 163 Om, 144 Ovs, UV (THF): 25.4, 34.0, 38.8 hK.

P a t e n t a n s p r ü c h e

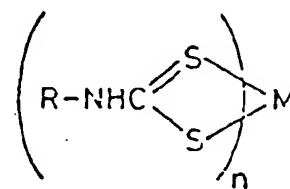
1. Verfahren zur photochemischen, katalytischen Spaltung von Wasser zu u.a. Wasserstoff, dadurch gekennzeichnet, daß man als Katalysatoren Metallkomplexverbindungen von Metallen der I, II, IV, V, VI, VII und VIII Nebengruppe des Periodensystems sowie Magnesium, in denen die Komplexliganden über je zwei Schwefelatome oder über ein Schwefel- und ein Stickstoffatom an das Metall gebunden sind, einsetzt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Katalysator ein Metalldithiolen des Typs 1, ein Metaldithiooxamid vom Typ 2 oder ein Metaldithiocarbamat vom Typ 3,



1



2



3

in denen M ein Metall wie in Anspruch 1 definiert ist, R = Wasserstoff, eine Alkyl-, Trifluormethyl-, Aryl-, Thioalkyl-, Thioaryl- oder Trithiocarbonatgruppe sein kann, n = 2 oder 3 und z = 0, -1 oder -2 sind.

3. Verfahren nach Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Katalysator ein Dithiolen- Dithiooxamid- oder Dithiocarbonat-Komplex von Eisen oder Nickel ist.
4. Verfahren nach Ansprüchen 1 - 3, dadurch gekennzeichnet, daß neben Wasser ein Lösungsmittel, bestehend aus einem Gemisch von Wasser und einem organischen Lösungsmittel wie z.B. Tetrahydrofuran, Dihydrofuran, bevorzugt 2,5-Dihydrofuran, oder Methylenchlorid benutzt wird.

5. Verfahren nach Ansprüchen 1 - 4, dadurch gekennzeichnet, daß man bei einer Temperatur von 10 °C bis 100 °C die Reaktion durchführt.
6. Verfahren nach Ansprüchen 1 - 5, dadurch gekennzeichnet, daß man als Lichtquelle Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda \geq 254$ nm benutzt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß man als Lichtquelle Sonnenlicht benutzt.

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(21) Anmeldenummer: 80101034.9

(51) Int. Cl.³: **C 01 B 3/04**
B 01 J 31/16, B 01 J 19/08

(22) Anmeldetag: 03.03.80

(30) Priorität: 06.03.79 DE 2908633

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
17.09.80 Patentblatt 80/19

(86) Veröffentlichungstag des später
veröffentlichten Recherchenberichts: 01.10.80

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH DE FR GB IT LU NL SE

(71) Anmelder: Studiengesellschaft Kohle mbH
Kaiser-Wilhelm-Platz 1
D-4330 Mülheim/Ruhr(DE)

(72) Erfinder: Kisch, Horst, Dr.
Bismarckstrasse 43
D-4300 Mülheim/ruhr(DE)

(74) Vertreter: von Kreisler, Alek et al,
Deichmannhaus am Hauptbahnhof
D-5000 Köln 1(DE)

(54) Verfahren zur photochemischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser.

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur photochemischen, katalytischen Spaltung von Wasser zu u.a. Wasserstoff, wobei man als Katalysatoren Metallkomplexverbindungen von Metallen der I. II., IV, V, VI, VII und VIII Nebengruppe der Periodensystems sowie Magnesium, in denen die Komplexliganden über je zwei Schwefelatome oder über ein Schwefel- und ein Stickstoffatom an das Metall gebunden sind, einsetzt.

EP 0 015 522 A3



EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int. Cl. 3)
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	betrifft Anspruch	
P, A	<u>FR - A - 2 432 475</u> (ANVAR)		C 01 B 3/04
A	<u>US - A - 4 105 517</u> (FROSCH)		B 01 J 31/16
P, A	<u>US - A - 4 169 030</u> (GRAY et al.)		19/08
A	<u>FR - A - 2 387 187</u> (NATIONAL RE- SEARCH DEVELOPMENT)		
A	<u>FR - A - 1 320 995</u> (I.C.I.)		

			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int. Cl. 3)
			C 01 B 3/04
			B 01 J 31/16
			31/18
			19/08
			KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE
			X: von besonderer Bedeutung
			A: technologischer Hintergrund
			O: nichtschriftliche Offenbarung
			P: Zwischenliteratur
			T: der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
			E: kollidierende Anmeldung
			D: in der Anmeldung angeführtes Dokument
			L: aus andern Gründen angeführtes Dokument
			&: Mitglied der gleichen Patent- familie, Übereinstimmendes Dokument
<input checked="" type="checkbox"/>	Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt.		
Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer	
Den Haag	14.07.1980	MICHIELS	